

## CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DE DIVERSAS ÁREAS LÍMITROFES CON LAS PRESAS DEL GUADALHORCE (PROVINCIA DE MÁLAGA)

JIMÉNEZ GAVILÁN, Pablo<sup>(1)</sup>; JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, Pedro<sup>(2)</sup>; MORALES CALVO, Luis<sup>(3)</sup> y RUIZ ANTÚNEZ, Ricardo<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. 29071 Málaga, España.  
(pgavilan@uma.es)

<sup>(2)</sup> C/ La Fuensanta, 6, 5ºA, 29640, Fuengirola (Málaga). (pejifer@gmail.com)

<sup>(3)</sup> Delegación Provincial de Málaga de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Paseo de Reding, 21 29071, Málaga. (luis.morales@juntadeandalucia.es);  
(ricardo.ruiz.antunez@juntadeandalucia.es)

**Palabras claves:** surgencias salinas, presas, Guadalhorce, hidrología, hidrogeología.

### RESUMEN

Las presas Conde de Guadalhorce y Guadalhorce-Guadalteba constituyen el Sistema de explotación Presas del Guadalhorce cuyo principal objetivo es garantizar el suministro de agua a la ciudad de Málaga y las dotaciones para el regadío de unas 9.600 hectáreas en el valle del Guadalhorce. Desde la puesta en servicio de la presa de Guadalhorce-Guadalteba, en el año 1973, se detectaron una serie de surgencias de carácter salino, aguas abajo de ésta, que llegaron a suponer un grave problema para la gestión del Sistema. El problema, de cara a la calidad del agua bruta suministrada al abastecimiento de Málaga, se ha minimizado a partir de la entrada en servicio de la planta desalobradoradora de El Atabal, en el año 2005. No obstante, se mantiene en cuanto al agua destinada al regadío del valle del Guadalhorce y, por ello, entre enero de 2010 y mayo de 2011, se ha llevado a cabo un control hidrodinámico e hidroquímico de los principales puntos identificados de descarga de agua salinizada, a lo largo del tramo comprendido entre el pie de las Presas del Guadalhorce y el contraembalse de La Encantada. Estos controles se han apoyado además en los datos históricos recopilados por el Servicio encargado de la explotación del Sistema.

Los resultados de este primer análisis ponen de manifiesto que los puntos de descarga situados en la margen izquierda del río Guadalhorce muestran una clara conexión con las aguas del vaso de Guadalhorce, de carácter salino, mientras que las situadas en la margen derecha deben su salinidad a contactos naturales entre materiales de naturaleza salina (facies Keuper) y calizas jurásicas que afloran en la región.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La ciudad de Málaga, con casi 570.000 habitantes censados en 2011, tiene como principal fuente de abastecimiento de agua potable los recursos procedentes de Los Embalses del Guadalhorce, ubicados a unos 65 km de la capital, entre los términos municipales de Álora, Antequera, Ardales, Campillos y Teba. Por tanto, la gestión de dicho Sistema es de gran importancia para Málaga y su conurbación.

El Sistema está formado por la presa del Conde de Guadalhorce, 1921), sobre el río Turón, y la presa de Guadalhorce - Guadalteba (1973) sobre los ríos del mismo nombre (Figura 1A). El embalse de Conde de Guadalhorce tiene actualmente una capacidad de 66,5 hm<sup>3</sup>, a N.M.N., y el de Guadalhorce-Guadalteba de 279 hm<sup>3</sup>. Aguas abajo de la confluencia de los tres ríos, con fines hidroeléctricos, se han construido la presa de Gaitanejo (1927) y el contraembalse de La Encantada (1978), este último a la salida del Desfiladero de los Gaitanes (Figura 1B). El conjunto de las Presas del Guadalhorce regula la cuenca alta de este río y constituye la regulación de cabecera del Plan Coordinado de Riegos del Guadalhorce, cuyos objetivos prioritarios son el abastecimiento a la ciudad de Málaga, el riego de unas 9.600 has en el valle inferior del Guadalhorce y los aprovechamientos hidroeléctricos subsidiarios (Ruiz y Morales, 2008).

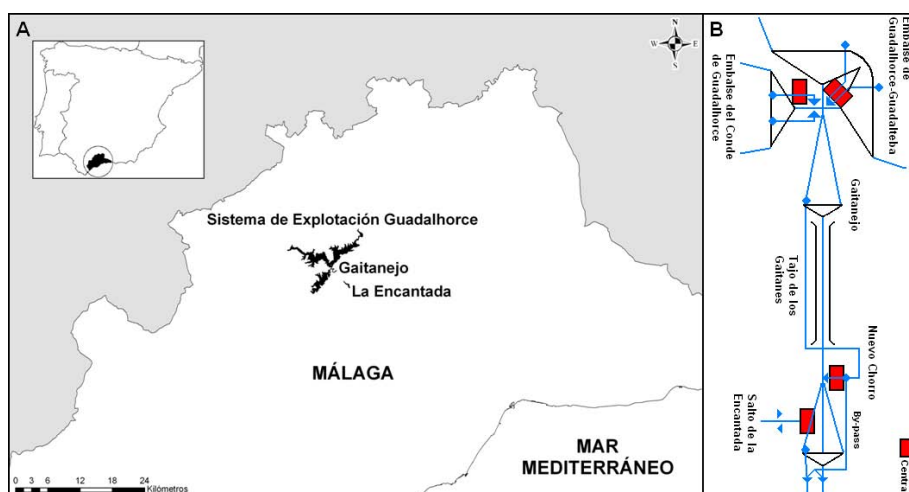


Figura 1. Situación geográfica del Sistema de explotación Guadalhorce (A) y esquema hidráulico de funcionamiento (B).

El subembalse del Guadalhorce, desde su puesta en servicio, presenta problemas de salinidad debido al aporte de salmueras procedentes de surgencias (Meliones) que drenan hacia el cauce del río Guadalhorce aguas con una elevada concentración en sales ( en torno a 150 gr. / l. de NaCl), procedentes del paso de éstas por facies Trías Keuper, que dan lugar a salinidades en el embalse que fluctúan entre 500 y 10.000 ppm deTDS (Carrasco, 1979, 1986; Escolano y Conejo, 1981; Benavente y Carrasco, 1985). La aportación media diaria, en el periodo 1981-2013, se cifra en 453 t. de NaCl con un máximo en1997 de 1.422 t. / día y un mínimo, en 2006, de 84 t. / día. La salinidad media del agua aportada por el río Guadalhorce en el mismo periodo es de 2,6 gr. / l. de NaCl.

Como consecuencia, la gestión conjunta de los embalses resulta muy compleja (Figura 1B), obligando a mezclar las aguas de los tres vasos para obtener contenidos salinos compatibles con su utilización (límite máximo de NaCl admitido para regadío 0,8 g/l). La explotación en estas circunstancias genera excedentes de agua salobre en el vaso de Guadalhorce que hay que verter al cauce en épocas de lluvia para intentar no dañar el ecosistema del propio cauce.

Asimismo, desde la puesta en servicio del subembalse del Guadalhorce, se han detectado, aguas abajo de éste (Figura 2), una serie de puntos de descarga con valores de salinidad elevados que aportan sal al Sistema lo que constituye un problema para la explotación ya que estas cantidades de sal, variables en función de los niveles del embalse, hay que tenerlas en cuenta en los cálculos de mezcla de agua de los distintos vasos para no sobrepasar los límites de salinidad aceptables por las demandas a servir.

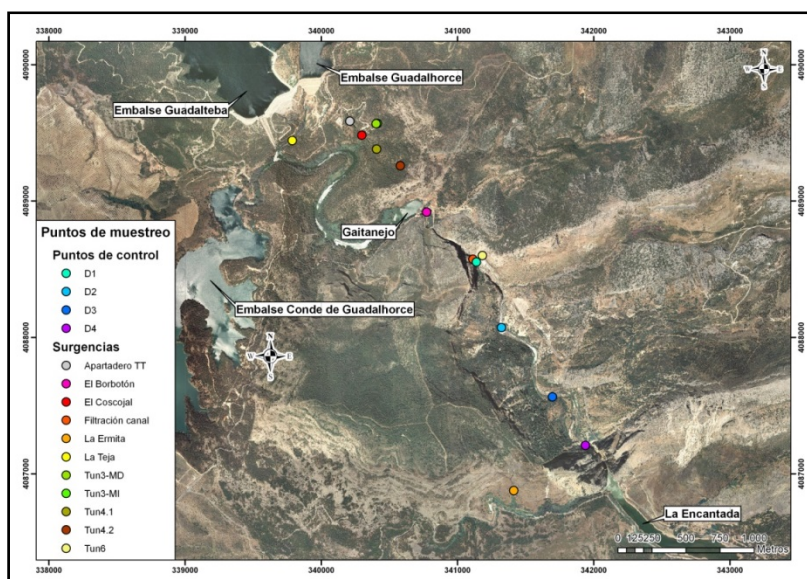


Figura 2. Situación de las surgencias salinas y de los puntos de muestreo analizados.

El objetivo que se pretende es la caracterización del funcionamiento hidrológico e hidrogeológico del entorno del contraembalse de La Encantada que permita determinar, por un lado, las vías principales de conexión del vaso del Guadalhorce con las formaciones hidrogeológicas aguas abajo de éste y, por otro, establecer una propuesta de las medidas a adoptar para su neutralización en el caso de que se considerase conveniente en un momento determinado.

## 2.- CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Dentro del tramo de estudio, comprendido entre el pie de las Presas del Guadalhorce y el contraembalse de La Encantada, cabe destacar, entre los principales rasgos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, el Desfiladero de los Gaitanes, en general muy angosto, excavado en buena parte sobre calizas jurásicas (Figura 2) y cuyas difíciles condiciones de accesibilidad limitan en gran medida las posibilidades de investigar lo que sucede en su interior.

La columna estratigráfica de la cerrada en la que se ubica la presa de Guadalhorce-Guadalteba (Figura 3) está constituida por calizas jurásicas, margas cretácicas, areniscas miocenas (molasa) y depósitos fluviales cuaternarios, de hasta 18 m de potencia, con limos de reciente sedimentación que se excavaron en su totalidad en el área de contacto de la presa con el terreno (Ruiz y Morales, 2008). No obstante, hay que reseñar que dentro del paquete molásico se encuentran areniscas mal cementadas, de distribución anárquica, que resultan evidentes en el entorno del estribo izquierdo de Guadalhorce (Figura 4).

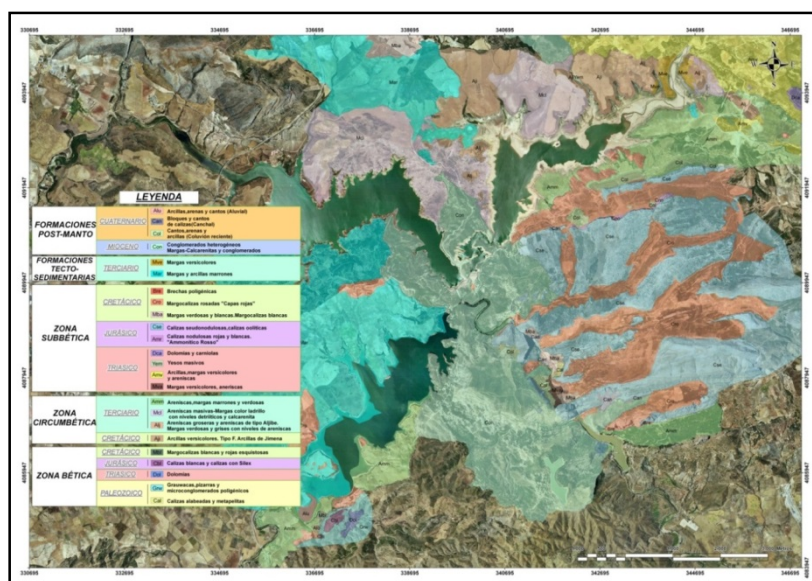


Figura 3. Cartografía litológica del área de estudio.

En la zona de El Coscojal (Figuras 2 y 3), principal punto de descarga salina, la molasa presenta una potencia aproximada de 40-50 m, seguidos de un nivel de unos 20 m de margocalizas cretácicas de facies “capas rojas”, que está ausente según el registro de algunas de las perforaciones realizadas en el área (GHUMA, 1995) y continúa hasta el final en calizas jurásicas karstificadas. Éstas últimas afloran en el área de estudio formando cuatro barras (Figura 3).



Figura 4. Plano geológico de la cimentación (tomado de CHSE, 1999).



En cuanto al comportamiento hidrogeológico de los principales paquetes litológicos que se encuentran en la zona de estudio, las molasas aparecen poco fracturadas y muy cementadas (matriz carbonática), por lo que han de considerarse en principio como terrenos de baja permeabilidad. Las margocalizas cretácicas de facies “capas rojas”, que alternan niveles margosos y margocalizos, muestran un comportamiento mayoritariamente impermeable, mientras que las calizas nodulosas y calizas oolíticas del Jurásico superior (Malm) se encuentran muy fracturadas y presentan un grado de karstificación muy elevado. Este rasgo, evidente a simple vista por sus manifestaciones geomorfológicas, encuentra confirmación en los huecos o cavidades encontrados durante la perforación de los sondeos del Plan Metasequia (1994-1995) en la zona del Coscojal (GHUMA, 1995), que fueron puestos en servicio obteniéndose elevados caudales, por lo que desde un punto de vista hidrogeológico han de ser catalogadas como rocas de muy alta permeabilidad.

Del carácter hidroquímico de las aguas del área de estudio cabe destacar que la mayor parte de las aguas de cabecera de las subcuencas del río Guadalhorce presentan facies bicarbonatadas cálcicas al drenar acuíferos de naturaleza carbonática, que evolucionan hacia facies cloruradas sódicas a medida que circulan a través de materiales evaporíticos procedentes del Trías (Carrasco *et al.*, 2005), con un aumento en la proporción de los iones procedentes de la halita ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ ).

### 3.- METODOLOGÍA

Como punto de partida, se llevó a cabo la recopilación de los datos hidrometeorológicos y de salinidad de los embalses, facilitados por el Servicio de Presas. Se realizó una base de datos en la que se aglutinó toda la información procedente de la aplicación HIDROLOGÍA del Servicio de Presas y de las series históricas de partes diarios, que hubo que digitalizar para el periodo comprendido entre los años 1987 y 1994 (ambos inclusive). En esta fase del estudio se prestó especial atención a tres aspectos fundamentales: los datos ausentes, los datos incorrectamente registrados y la consistencia interna de los mismos, corroborando los valores improbables obtenidos.

Posteriormente, una vez analizados los datos anteriores, se determinó el inventario de puntos de agua mediante campañas de campo. No obstante, para caracterizar con un mayor grado de detalle la problemática en el sector de La Encantada, se inició el control del quimismo y del caudal de los principales puntos de drenaje que concentran las principales aportaciones salinas a dicho embalse, así como de las aguas a lo largo del tramo de estudio (Figura 2).

El control foronómico se realizó mediante aforos con micromolinete, de manera que las distintas variables fueron medidas siempre en los mismos lugares, acondicionando secciones adecuadas a tal acción.

Por último y, paralelamente al control foronómico e hidroquímico, se ha realizado la cartografía geológica de detalle (Figura 3), tomando, a su vez, nota de todos los rasgos geológicos de interés (estratigráficos y estructurales), incluida la recopilación

de las columnas litoestratigráficas de las diferentes captaciones que se encuentran ubicadas dentro del ámbito de estudio.

#### 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se muestran los valores medios, máximos y mínimos del conjunto de parámetros físico-químicos y foronómicos.

	Aparadero TT			D1			D2			D3			D4		
X (ETRS83)	340210			341138			341323			341636			341939		
Y (ETRS83)	4083580			4088550			4088070			4087560			4087210		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
Caudal (l/s)	4,84	11,73	1,00										477,10	540,33	404,45
pH	7,32	7,36	7,87							8,62	8,62	8,62	8,68	8,73	8,63
T (°C)	15,12	16,30	13,30	16,20			19,20			18,25	19,40	17,10	18,37	19,50	17,50
C.E. (mS/cm)	3,89	4,36	2,32	2,01			3,00			2,70	2,85	2,55	2,61	2,77	2,48
TAC (mg/l)	255,2	279,0	224,8	227,6			224,7			208,9	211,1	206,6	211,1	218,8	203,9
TOC (mg/l)	1,2	1,2	1,1	1,5			1,1			1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	0,8
F (mg/l)	0,3	0,3	0,2	0,2			0,2			0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Cl (mg/l)	1311,0	1638,0	388,7	606,2			849,8			807,0	854,6	759,5	763,2	787,5	733,0
Nitritos (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,2			0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NO3 (mg/l)	11,2	19,5	0,7	4,7			5,1			8,1	11,4	4,7	8,3	10,5	4,1
SO4 (mg/l)	317,0	341,6	278,7	118,7			151,1			168,6	187,0	150,3	157,2	185,1	140,7
Li (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,0			0,0			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na (mg/l)	825,8	1052,8	628,0	339,0			539,5			511,4	536,4	486,5	482,7	439,8	468,9
K (mg/l)	4,3	5,5	3,5	2,4			2,1			2,7	3,3	2,1	2,3	3,1	1,7
Ca (mg/l)	121,8	139,6	91,6	80,2			79,8			30,6	30,8	30,3	70,5	81,4	51,9
Mg (mg/l)	41,0	43,7	39,9	25,7			32,4			30,7	32,1	29,3	28,7	30,1	28,1

	El Borbotón			El Coscojal			Filtración canal			La Ermita			La Teja		
X (ETRS83)	340773			340297			341113			341412			333787		
Y (ETRS83)	4088920			4088480			4088570			4086880			4088440		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
Caudal (l/s)				64,87	103,37	34,07	6,34	10,37	5,39	5,31	5,36	4,66	0,53	0,70	0,35
pH	7,39	7,39	7,38	8,12	8,25	7,38	8,37	8,40	8,33	7,57	7,61	7,51	7,38	8,06	7,30
T (°C)	18,18	20,10	16,30	15,43	17,40	12,60	19,54	22,00	17,70	21,45	22,60	21,00	20,03	20,30	19,70
C.E. (mS/cm)	3,50	5,30	2,30	4,19	5,34	2,35	6,00	6,35	5,48	6,38	7,20	4,32	2,03	2,41	1,79
TAC (mg/l)	254,8	263,5	237,8	230,3	268,0	185,8	224,5	232,0	214,1	240,7	267,4	228,2	264,7	281,5	220,2
TOC (mg/l)	0,8	1,0	0,5	1,5	2,0	1,1	0,6	0,7	0,6	0,4	0,6	0,3	0,2	0,3	0,2
F (mg/l)	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Cl (mg/l)	1054,6	1564,3	674,8	1433,6	1947,0	321,6	2037,6	2313,9	1801,5	2154,3	2460,1	1557,2	673,8	1374,7	432,5
Nitritos (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NO3 (mg/l)	8,3	11,5	4,0	10,7	16,6	1,8	2,0	4,5	0,9	1,7	5,6	0,2	8,2	3,8	6,6
SO4 (mg/l)	170,3	223,3	128,7	309,3	342,3	264,1	280,4	302,5	261,7	276,1	304,0	187,4	99,2	161,6	75,8
Li (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na (mg/l)	653,6	932,7	457,8	894,9	1118,9	584,0	1220,8	1361,0	1096,4	1229,5	1394,3	897,5	416,3	719,0	312,7
K (mg/l)	2,2	2,4	1,8	4,2	5,4	3,3	4,9	11,6	2,8	4,3	5,0	3,7	1,9	2,3	1,2
Ca (mg/l)	103,7	125,1	63,6	120,7	143,8	69,4	117,4	127,0	111,1	139,4	161,6	116,6	71,6	105,4	58,3
Mg (mg/l)	32,3	42,8	23,7	35,6	39,0	31,3	42,0	47,8	38,0	53,6	61,8	39,9	29,4	44,8	24,2

	Tun3-MD			Tun3-MI			Tun4.1			Tun4.2			Tun6		
X (ETRS83)	340402			340412			340406			340580			341183		
Y (ETRS83)	4083570			4083570			4083380			4083260			4083600		
	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo	Media	Máximo	Mínimo
Caudal (l/s)															
pH	8,39	8,50	8,31	8,29	8,48	7,99	8,03	8,20	7,78	7,97	8,08	7,73	8,74	8,75	8,73
T (°C)	15,48	17,50	13,60	15,50	17,30	13,40	18,93	19,30	18,60	18,54	18,90	17,50	17,40	18,50	14,50
C.E. (mS/cm)	3,65	4,29	1,78	4,02	4,30	0,54	3,75	4,30	2,74	3,46	5,12	2,60	3,26	3,38	3,05
TAC (mg/l)	242,3	272,4	210,2	230,2	254,9	204,9	264,2	292,1	219,2	263,5	283,1	213,0	235,6	246,6	214,2
TOC (mg/l)	0,4	0,9	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3
F (mg/l)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Cl (mg/l)	1287,8	1515,6	468,5	1462,3	1805,4	66,8	1235,8	1798,2	763,8	1105,6	1885,2	749,4	1048,2	1145,7	985,9
Nitritos (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NO3 (mg/l)	11,0	13,3	6,3	9,6	10,7	8,6	6,8	11,6	2,8	6,5	10,1	3,1	6,8	8,4	5,8
SO4 (mg/l)	180,6	211,3	70,5	210,2	265,2	19,4	173,8	231,5	129,6	175,1	246,5	125,6	158,9	164,5	155,6
Li (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na (mg/l)	545,6	688,9	263,8	653,8	927,7	47,0	807,9	1030,1	576,4	701,5	1061,5	511,0	651,8	707,5	621,5
K (mg/l)	2,2	3,1	1,6	2,4	4,7	0,9	2,9	6,0	1,8	2,9	4,4	1,9	6,2	17,4	2,4
Ca (mg/l)	121,2	139,8	77,6	129,1	156,7	68,2	79,7	111,3	53,2	86,8	109,3	62,0	73,7	76,7	71,0
Mg (mg/l)	144,5	177,3	39,6	139,9	181,4	6,8	30,1	42,6	18,0	35,4	43,2	28,8	44,5	53,4	39,7

Tabla 1. Parámetros estadísticos del control foronómico y de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de los puntos de control muestreados.

La facies hidroquímica dominante en la zona de estudio es la clorurada sódica (Figura 5); sólo las muestras de Valle de Abdalajís (bicarbonatada cálcica), de Arroyo Granados (bicarbonatada-clorurada, cálcica-magnésica), ambas fuera de la zona de estudio y de Ermita-dulce (clorurada, cálcica-magnésica) se alejan de esta clasificación.

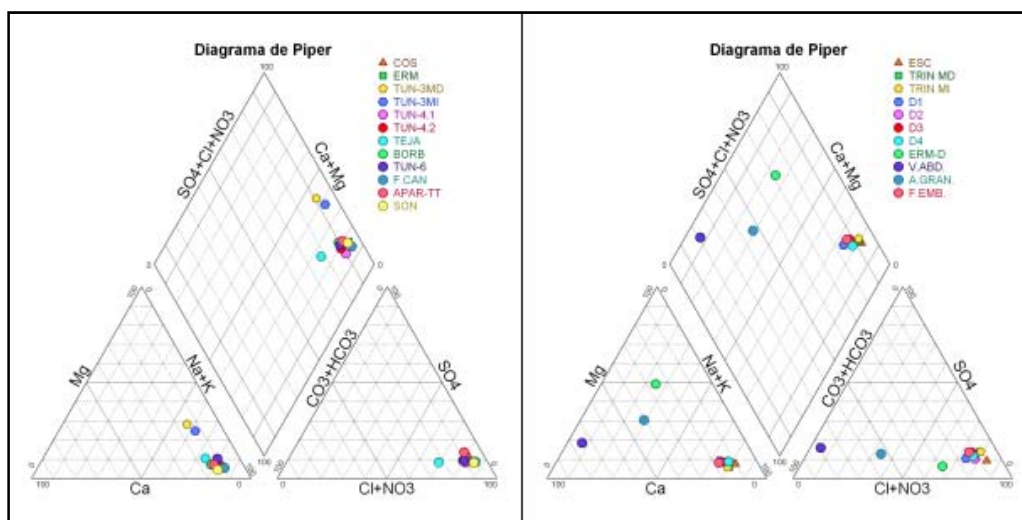


Figura 5. Situación en un diagrama de Piper de las surgencias salinas y los restantes puntos de agua muestreados.

Con los caudales aforados y los valores de conductividad eléctrica para el mismo periodo (Tabla 1), se ha obtenido un aporte medio diario aproximado de 50 toneladas de NaCl al contraembalse de La Encantada. Además, para controlar el cauce del río Guadalupe desde Gaitanejo hasta la cola del contraembalse de la Encantada (Figura 2), se llevaron a cabo medidas de la conductividad eléctrica, así como la toma de muestras en 4 puntos de control (D1, D2, D3 y D4). A la vista de los resultados obtenidos (Tabla 1), se ha identificado un punto a partir del cual aumenta la conductividad eléctrica de las aguas (aguas abajo de D2), probablemente debido a una surgencia en el cauce, cuya ubicación exacta no puede ser determinada, ya que se encuentra en una zona conunalámina de agua superior a 2,5 m. Desde este punto, hasta la cola del embalse, deben existir algunas aportaciones de aguas subterráneas procedentes de los relieves carbonáticos y, por tanto, con un menor grado de salinidad, que dan lugar a un descenso continuado de la conductividad eléctrica.

A partir de la información hidroquímica de las diferentes campañas de control (Tabla 1) se ha realizado un Análisis de Componentes Principales (Figura 6), en el que se han tenido en cuenta las siguientes variables: temperatura, conductividad eléctrica, alcalinidad total y los contenidos en carbono orgánico total, flúor, cloro, nitratos, sulfatos, potasio, calcio y magnesio.

En la representación gráfica del ACP (Figura 6) se observan agrupaciones de muestras que indican diferencias entre los puntos de control, como es el caso de las muestras de la Ermita claramente influenciadas por la CE, asociadas al eje F1 (eje de la mineralización). También se aprecia como el contenido en TOC puede ser utilizado, a priori, como indicador de aguas superficiales (embalse), agrupándose las

muestras que claramente tienen dicho origen (F. Emb, Coscojal y Apar. TT) en torno al eje F3. También encontramos una clara agrupación de las muestras de Tun3 (MD y MI) en torno al eje F3, pero en este caso debido al contenido en  $Mg^{2+}$ , sin estar aún clara la posible fuente de aporte.

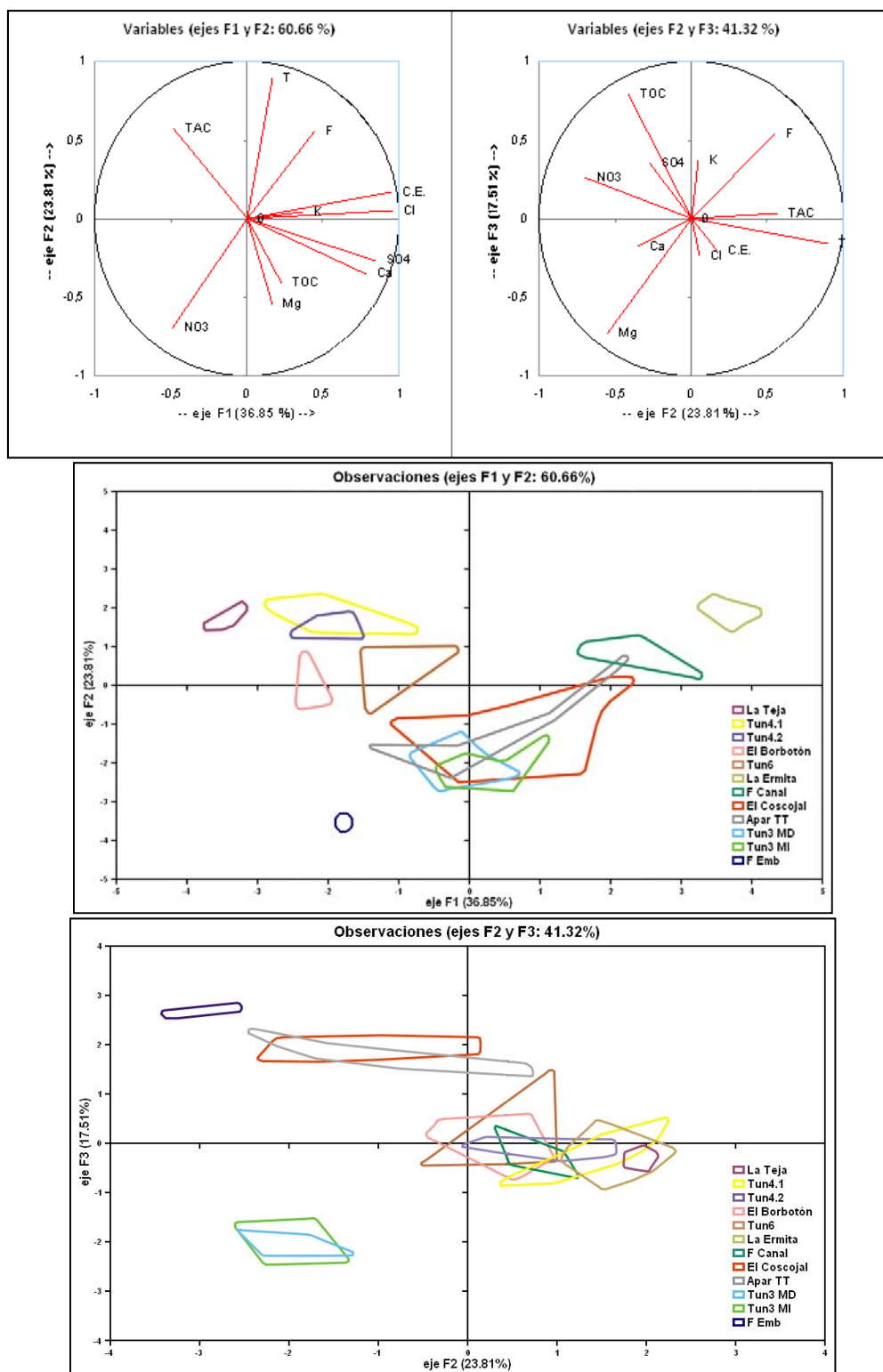


Figura 6. Representación de los factores I-II y II-III del análisis de componentes principales efectuado con los parámetros hidroquímicos medios de las aguas drenadas por los manantiales estudiados



## 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existe una correlación entre las aguas del fondo del embalse del Guadalhorce y las surgencias situadas en la margen izquierda del río Guadalhorce (sector de El Coscojal). Estos puntos de descarga proceden de filtraciones del embalse del Guadalhorce, que en principio se transmiten a través de la molasa que, aunque presente una baja transmisividad, la carga hidráulica generada por el embalse facilita el tránsito del agua a través de ésta. En cuanto al resto de surgencias, el manantial de El Borbotón, constituye el drenaje natural del acuífero de la barra de calizas más septentrional de la Sierra de Abdalajís, cuyo funcionamiento se encuentra también influenciado por las filtraciones del embalse del Guadalhorce a través de los materiales de la molasa. En cuanto al manantial de La Ermita y la surgencia denominada Filtración canal, corresponden a puntos de descarga natural de las diferentes barras calizas que presentan un caudal constante y elevada salinidad y temperatura, debido a la presencia de un contacto profundo entre los materiales salinos (facies Keuper) de carácter acuífero y las diferentes barras de calizas, lo que confieren a las aguas de estos puntos de descarga el carácter salobre y su elevada temperatura. La presencia de surgencias de carácter natural en el propio Río Guadalhorce, aunque de menor entidad que las dos anteriores, corroboran el carácter natural salobre de las descargas de este sector.

Las consecuencias de la puesta en servicio y explotación de los sondeos del Plan Metasequía (1994-1995) han sido el aumento de las filtraciones a través de la molasa, como consecuencia del incremento de la transmisividad de esta formación y, con ello, se ha provocado un mayor flujo del conjunto de filtraciones de los materiales molásicos hacia el acuífero de la barra de calizas más septentrional de la Sierra de Abdalajís, que es drenada de manera natural por el manantial de El Borbotón.

Por otro lado, tras el análisis de la fracturación de la cartografía geológica de detalle del estribo izquierdo se puede afirmar que los aumentos de la transmisividad en los materiales que constituyen este estribo (molasa) no han producido un aumento de la fracturación y, por tanto, no se ha incrementado el riesgo de colapso de dicho estribo. Además, a partir de estos trabajos se descartan vías preferenciales de infiltración diferentes de los materiales de la propia molasa. Por ello, el aumento de la conexión hidrogeológica (vías preferenciales de filtración) entre los materiales que constituyen la molasa y la formación carbonática se ha debido desarrollar, muy probablemente, a través de las zonas de areniscas mal cimentadas del estribo izquierdo, tal y como se pone de manifiesto tras la importante disminución de caudal que se produjo en las filtraciones de la galería 10 y en los manantiales de la zona de El Coscojal (Figura 7A), a raíz de la tormenta del 28 de septiembre del año 2012, que introdujo un importante aporte de materiales finos y cuya acumulación impermeabilizó, de manera transitoria, las citadas vías preferenciales de filtración.

Por último, se proponen dos potenciales soluciones para tratar de minimizar la problemática de salinización aguas abajo del Embalse del Guadalhorce y mitigar los efectos perjudiciales derivados de este problema:

- Estudio geofísico en el estribo izquierdo para la identificación del conjunto de areniscas mal cimentadas.
- Impermeabilización en el estribo izquierdo, en aguas bajas, mediante el aporte y compactación de tongadas de materiales impermeables (arcillas principalmente). Según los datos del embalse (obviando la primera etapa de llenado) la cota se ha situado por debajo de la cota 340 m s.n.m. en varias ocasiones (1985, 1994-95, 2002, 2004, 2005, 2006-08), coincidiendo con los principales episodios de sequías. Esta actuación llevaría consigo un aumento de la presión en el estribo izquierdo, por lo que la actuación estaría acompañada con una red de drenes verticales a fin de liberar dicho aumento de presión (Figura 7B).

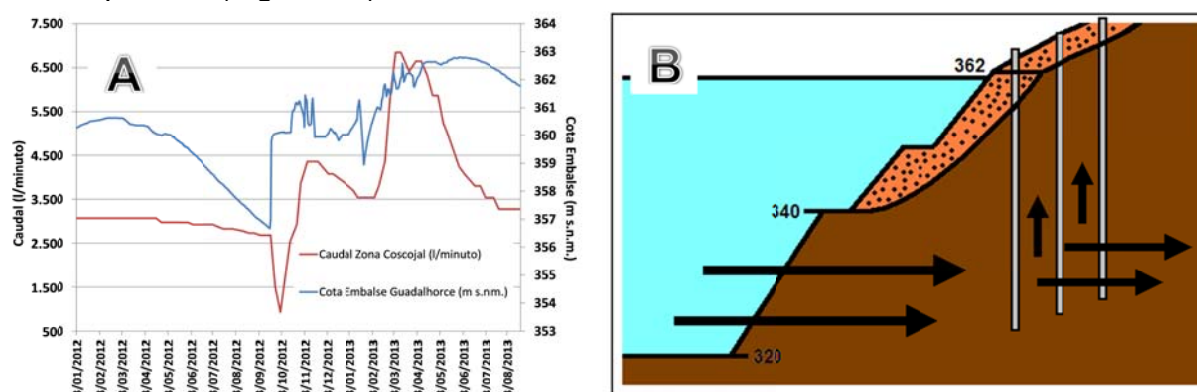


Figura 7. Evolución de la cota de embalse del Guadalhorce y del caudal en la zona del Coscojal durante los años 2012 y 2013 (A) y esquema de la actuación de impermeabilización -valores de cota en m s.n.m.- (B).

## Agradecimientos

Este trabajo constituye una contribución al proyecto IGCP-598 de la UNESCO así como al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

## REFERENCIAS

- Benavente, J. y Carrasco, F. (1985). Influence of evaporite karst in the streamwater quality of Guadalhorce River (Andalucía, Spain). *Le Grotted'Italia*, 4 XII: 39-48.
- Carrasco, F. (1979). Captación de manantiales salinos subacuáticos en el fondo de embalses: manantial de Meliones. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, IV:465-479.
- Carrasco, F. (1986). *Contribución al conocimiento de la cuenca alta del río Guadalhorce: El medio físico. Hidrogeoquímica*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 435 p.
- Carrasco, F., Sánchez, D., Vadillo, I., Fernández, Á., Pérez, R., Benavente, J., Almécija, C., Fernández-Ruiz, L. y Martínez-Navarrete, C. (2005). Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales de la cuenca del río Guadalhorce (Provincia de Málaga) para la aplicación de la Directiva Marco de Aguas. En J.A. López-Geta, J.C. Rubio y M. Martín Machuca (Eds.) *VI Simposio del Agua en Andalucía*. IGME, 543-551.
- CHSE (1999). Documento XYZT de la Presa Guadalhorce-Guadaleba.
- Escolano, A., Conejo, R. (1981). Eliminación y explotación del manantial salino de Meliones (Málaga) para evitar la salinización del río Guadalhorce. *SIAGA*, I: 469-486.
- GHUMA (1995). Estudio hidrogeológico para el aprovechamiento de los acuíferos de la cuenca del Guadaleba y de la sierra del Valle de Abdalajís para abastecimiento a Málaga. Informe inédito.
- Ruiz, R y Morales, L. (2008). Graficación sobre mapas de frecuencia. *VIII Jornadas Españolas de Presas*, Córdoba (España).